

IHLAMUR (*Tilia grandifolia* Ehrh.) ODUNUNUN BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE YOĞUNLAŞTIRMA VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

Mehmet BUDAKÇI¹, Hüseyin PELİT^{1,*}, Abdullah SÖNMEZ², Mustafa ALTINOK²

¹Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü,
Düzce, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye

mehmetbudakci@duzce.edu.tr, *huseyinpelit@duzce.edu.tr, asonmez@gazi.edu.tr,
altinok@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, ıhlamur (*Tilia grandifolia* Ehrh.) odununun bazı fiziksel özelliklerine termo-mekanik yoğunlaştırma ve ısıtma işlem etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Örnekler, özel tasarlanmış hidrolik preste 100 °C ve 140 °C sıcaklıkta, %25 ve %50 sıkıştırma oranında radyal yönde sıkıştırılarak yoğunlaştırılmıştır. Daha sonra örnekler 185 °C ve 212 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile ısıtma işlem (ThermoWood yöntemi) uygulanmıştır. Fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimleri tespit etmek için geri esneme (spring-back) oranı, hava kurusu yoğunluk (TS 2472) ve radyal doğrultuda şişme (TS 4084) testleri yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; her iki sıkıştırma oranında 100 °C’de yoğunlaştırılan örneklerde geri esneme oranı düşük ve yoğunluk artışı daha yüksek elde edilmiştir. Isıtma işlem sonrası yoğunlukta azalma olmuş ancak, ısıtma işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak boyutsal kararlılıkta önemli oranlarda iyileşme sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Ihlamur odunu; yoğunlaştırma; ısıtma işlem; fiziksel özellikler.

EFFECTS OF DENSIFICATION AND HEAT TREATMENT ON SOME PHYSICAL PROPERTIES OF LINDEN (*Tilia grandifolia* Ehrh.) WOOD

Abstract

In this study, determine of effects thermo-mechanically densification and heat treatment on some physical properties of linden (*Tilia grandifolia* Ehrh.) wood were

aimed. Samples were densified in the radial direction with a specially designed hydraulic press machine with compression ratios of 20% and 40%, and at 100 °C and 140 °C. Then, heat treatment (ThermoWood process) was applied to the samples during 2 h at temperatures 185 °C and 212 °C. In order to determine the changes occurring in physical properties, tests of spring-back ratio, air-dry density (TS 2472), and swelling (TS 4084) in radial direction were conducted. According to results of the research, at the both compression ratios the lower spring-back ratio and higher density increase were observed in the samples densified at 100 °C. After heat treatment, it was occurred decrease in density but depending on the increase in heat treatment temperature, significantly improvement in dimensional stability was achieved.

Keywords: Linden wood; densification; heat treatment; physical properties.

1. Giriş

Son yıllarda, ahşap ve ahşap ürünlerin özelliklerini artırmak için farklı modifikasyon yöntemlerinin uygulanmasında hızlı bir artış olmuştur. Ahşap özelliklerini artırmak için özellikle termal-ısı, termo-mekanik (TM) ve termo-hidro-mekanik (THM) işlemler yaygın olarak çalışılmakta ve uygulanmaktadır [1]. Isıl işlem, ağacın kimyasal bileşenlerinin moleküler yapısında kalıcı değişiklikler meydana getiren bir uygulamadır. Bu uygulamanın temel fikri kimyasal reaksiyonların hızlandığı yaklaşık 150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ağaç malzemenin ısı ile muamele edilmesidir [2,3]. Ağaç malzeme özelliklerinin geliştirilmesinde farklı ısı işlem yöntemleri kullanılmaktadır. Bunların içinde en yaygın olanları ise ThermoWood yöntemi, Plato yöntemi, Retification yöntemi, Le Bois Perdure yöntemi ve Oil Heat Treatment (OHT) yöntemidir [4]. Isıl işlem uygulanmış ağaç malzemenin biyolojik direnci ve boyutsal stabilitesi artmakta, rengi değiştirilebilmektedir. Ancak bu uygulamanın önemli bir dezavantajı, farklı çalışmalarda da belirtildiği gibi ağaç malzemenin yoğunluğunun ve mekanik direnç özelliklerinin azalmasıdır [3,5,6-12].

Yoğunluğu yüksek ağaç malzeme, strüktürel uygulamalar ve aşınma direncinin önemli olduğu yerler için gereklidir. Düşük yoğunluklu ve ticari olarak ilgi çekici olmayan ağaç türleri yoğunlaştırma işlemi ile modifiye edilerek, yüksek performanslı ve değerli ürünler haline getirilebilir. Yoğunluğu yüksek denebilecek ağaçların bile yoğunlaştırma işlemleri uygulanarak sertlik ve direnç özellikleri daha da iyileştirilebilir

[13,14]. Ağaç malzeme basınç altında sıkıştırılarak, hücre çeperinine bazı kimyasalların impregnasyonu ile veya sıkıştırma ve impregnasyonun birlikte kullanılmasıyla yoğunlaştırılabilmektedir. Sıkıştırılarak yoğunlaştırmada ahşabın doğal elastik yapısı önemli bir rol oynar. Sıkıştırma özellikleri çoğunlukla ağacın yoğunluğuna, rutubetine, sıkıştırma oranına ve yönüne bağlıdır [15,16]. Ağaç malzemenin sıkıştırılması sonucu özellikleri geliştirilebilmektedir. Ancak yoğunlaştırılmış ahşap yüksek seviyede neme veya suya maruz kaldığında sıkıştırılmadan önceki başlangıç ölçülerine geri dönme/esneme (spring-back) eğilimi gösterir. Bu durum; suyun etkisi ile hücre çeperindeki genişleme, sıkıştırma nedeni ile malzeme yapısında oluşan iç gerilmelerin rahatlaması ve özellikle hücrenin eski şeklini geri alma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır [5,13,17-21]. Bu bilgiler ışığında, farklı modifikasyon yöntemlerinin birlikte kullanılması durumunda özellikleri geliştirilmiş yeni malzemeler üretilebileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın amacı termo-mekanik (TM) yoğunlaştırma ve ısıtma işlemi (ThermoWood yöntemi) ile modifiye edilmiş ıhlamur (*Tilia grandifolia* Ehrh.) odununun bazı fiziksel özelliklerini belirlemektir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

2.1.1. Ağaç malzemenin hazırlanması

Bu çalışmada, nispeten düşük yoğunluklu ve geniş yapraklı ağaç türlerinden olan ıhlamur (*Tilia grandifolia* Ehrh.) kullanılmıştır. Düzce ilindeki bir kereste işletmesinden tomruk halinde temin edilen ıhlamur odunu aynı işletmede otomatik kontrollü şerit testere makinesinde kuruma payı ve test örneği ölçüleri dikkate alınarak, yıllık halkalar yüzeye paralel (teğet kesit) gelecek şekilde ve diri odun kısımlarından kaba ölçüde kerestelere dönüştürülmüştür. Örneklerin hazırlanmasında TS 2470’de belirtilen esaslara uyulmuş ve örneklerde çürük, budak, çatlak, renk ve yoğunluk farkı olmamasına dikkat edilmiştir [22]. Hazırlanan örnekler doğal kurutmaya tabi tutularak yaklaşık %12 rutubete kadar kurutulmuş, daha sonra Tablo 1’de belirtilen ölçülere getirilmiştir.

Tablo 1. Örneklerin yoğunlaştırma öncesi ölçüleri

Sıkıştırma oranı (%)	Uzunluk-boyuna yön (mm)	Genişlik-teğet yön (mm)	Kalınlık-radyal yön (mm)
Kontrol	400	95	20

25	400	95	26.7
50	400	95	40

Örnekler, yoğunlaştırma işlemi öncesi TS 2471'e göre 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi $\%65\pm 3$ olan iklimlendirme kabininde değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir. İklimlendirme sonrası meydana gelebilecek rutubet değişikliklerini önlemek için örnekler, yoğunlaştırma anına kadar plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir [23].

2.1.2. Yoğunlaştırma

Örnekler; tabla ebatları 60×60 cm² olan sıcaklık ve basınç kontrolü yapılabilen özel tasarlanmış bir hidrolik pres kullanılarak Termo-Mekanik yöntemle yoğunlaştırılmıştır. Yoğunlaştırma işlemi, 100 ± 5 °C ve 140 ± 5 °C sıcaklıkta, $\%25$ ve $\%50$ hedef sıkıştırma oranında 4 farklı varyasyon oluşturularak yapılmıştır. Yoğunlaştırma varyasyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yoğunlaştırma varyasyonları

Presleme sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma oranı (%)	Süre (dak.)
100	25	Isıtma + 10
	50	
140	25	
	50	

Pres tablasına yerleştirilen örnekler ilk olarak, her iki yüzeyi pres tablasına temas edecek şekilde hafif bir basınç altında tutulmuş ve dijital ısı ölçerle kontrol edilerek örneklerin iç sıcaklığı pres tablalarının sıcaklık değerine ulaşmaya kadar bu pozisyonda bir süre bekletilmiştir. Daha sonra 60 mm/dak. yükleme hızında örneklerin radyal yönde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hedeflenen sıkıştırma kalınlığını (20 mm) elde edebilmek için belli aralıklarla pres tablasına metal stoplama çitaları yerleştirilmiştir (Şekil 1). Yoğunlaştırılan örnekler 10 dakika süre ile basınç altında tutulmuş ve bu sürenin sonunda presten alınarak, geri esneme etkisini en aza indirmek amacı ile ortalama 5 kg/cm²'lik basınç altında oda sıcaklığına kadar soğuması sağlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Örneklerin yoğunlaştırılması (a), yoğunlaştırılan örneklerin soğutulması (b)

2.1.3. Isıl işlem

Deney örneklerinde boyutsal kararlılığın sağlanması amacı ile ısıl işlem uygulaması yapılmıştır. Isıl işlem uygulaması, ThermoWood Handbook (2003)'de tanımlanan metoda göre, üç aşamada (yüksek sıcaklıkta kurutma, ısıl işlem, soğutma ve kondisyonlama) gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada ısı ve buhar kullanılarak fırın sıcaklığının hızlı bir şekilde artırılması ile yaklaşık %0 rutubete kadar kurutulmuş olan örnekler ikinci aşamada, hedeflenen iki farklı sıcaklıkta (185 °C ve 212 °C) iki saat süre ile ısıl işlem uygulanmıştır. Üçüncü aşamada ise sıcaklık düşürülüp su spreyi kullanılarak örneklerin rutubet miktarının yaklaşık %4-6'ya ulaşması sağlanmıştır [24].

Isıl işlem uygulamasından sonra deney örnekleri düzgün bir şekilde istiflenerek 3 hafta süre ile 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65 \pm 3$ bağıl nem koşullarında dinlendirilmiştir. Ardından örnekler 30 x 20 x 20 mm (uzunluk-boyuna yön x genişlik-teğet yön x kalınlık-radyal yön) ölçülerinde ve her bir test değişkeni için 10 tekrarlı olacak sayıda kesilmiştir. Geri esneme oranlarının belirlenmesi için kullanılacak örneklerin kalınlıkları sabit kalmıştır. Kesim sonrası örnekler, TS 2471'e göre 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi $\%65 \pm 3$ olan iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir [23]. İklimlendirme sonrası rutubet değişimlerini önlemek için örnekler, ölçüm-deney anına kadar plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir.

2.2. Metot

2.2.1. Geri esneme (spring-back) oranının belirlenmesi

Sıkıştırılmış ağaç malzemenin elastik davranışından dolayı, uygulanan basıncın ortadan kaldırılmasından sonra sıkıştırılmadan önceki orijinal şeklini geri kazanma eğilimi vardır. Bu davranış ise geri esneme olarak tanımlanır ve sıkıştırılmış haldeki ölçüde değişikliğe sebep olur [25]. Sıkıştırma aşamasında örneklerin basınç altındaki kalınlıkları (K_1) ile sıkıştırma ve ısıl işlem sonrası kondisyonlanan (20 ± 2 °C ve $\%65 \pm 3$

RH) örneklerin kalınlıkları (K_2) $\pm 0,01$ mm hassasiyetinde belirlenmiş ve geri esneme oranları (GEO) Eş. 1'e göre hesaplanmıştır [5,13,14].

$$GEO = [(K_2 - K_1) / K_1] \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

2.2.2. Hava kurusu yoğunluğun belirlenmesi

Yoğunluklar TS 2472 esaslarına göre belirlenmiştir. Örnekler 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65 \pm 3$ bağıl nem şartlarındaki iklimlendirme kabiniinde değişmez ağırlığa ulaşınca kadar bekletilmiştir. Bu durumdaki örneklerin kütleleri (M_{12}) $\pm 0,01$ gr hassasiyetindeki analitik terazide tartılmış, boyutları (uzunluk, genişlik, kalınlık) ise kumpas ile $\pm 0,01$ mm hassasiyetinde ölçülerek hacimleri (V_{12}) belirlenmiştir. Hava kurusu yoğunluklar (δ_{12}) Eş. 2'ye göre hesaplanmıştır [26].

$$\delta_{12} = M_{12} / V_{12} \quad [g/cm^3] \quad (2)$$

2.2.3. Radyal doğrultuda şişme oranının belirlenmesi

Radyal doğrultuda şişme oranları TS 4084 esaslarına göre belirlenmiştir. Örnekler 103 ± 2 °C sıcaklıktaki kurutma fırını içerisinde değişmez ebatlara ve ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiş ve bu durumdaki kalınlıklar (L_0) $\pm 0,01$ mm hassasiyetinde belirlenmiştir. Daha sonra örnekler, 20 ± 2 °C sıcaklıktaki temiz su içerisine tamamen batırılarak kalınlık yönündeki boyutları değişmez hale gelene kadar bekletilmiştir. İlk ölçüm noktasından bu durumdaki kalınlıklar (L_R) tekrar ölçülmüş ve radyal doğrultudaki maksimum şişme oranları (α_k) Eş. 4'e göre hesaplanmıştır [27].

$$\alpha_k = [(L_R - L_0) / L_0] \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

2.2.4. İstatistiksel analiz

İstatistiksel değerlendirmelerde, MSTAT-C paket programı kullanılmıştır. İşlem grupları ile kontrol grupları arasında varyans analizleri (ANOVA) yapılmış ve elde edilen verilerde gruplar arası fark anlamlı çıktığında, Duncan testi sonuçları ile ortalama değerler arasındaki fark karşılaştırılmıştır. Böylece, denemeye alınan faktörlerin birbirleri arasındaki başarı sıralamaları, en küçük önemli fark (LSD) kritik değerine göre homojenlik gruplarına ayrılarak belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Geri esneme oranı

Termo-mekanik yöntemle yoğunlaştırılmış ve ısıtıl işlem uygulanmış ıhlamur örneklerinin geri esneme oranı değerlerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 3'de

verilmiştir.

Tablo 3. Geri esneme oranı değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P≤0,05
Yoğunlaştırma (A)	3	9911.526	3303.842	490.3041	0.0000*
Isıl işlem sıcaklığı (B)	2	2553.380	1276.690	189.4662	0.0000*
Etkileşim (AB)	6	205.936	34.323	5.0936	0.0001*
Hata	108	727.742	6.738		
Toplam	119	13398.58			

*: 0,05'e göre önemli

Varyans analizi sonucuna göre, geri esneme oranı değerleri üzerinde yoğunlaştırma ve ısıtma etkileri ile bunların karşılıklı etkileşimi önemli bulunmuştur (P≤0,05). Yoğunlaştırma ve ısıtma sıcaklığı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Yoğunlaştırma ve ısıtma sıcaklığı düzeyinde geri esneme oranı değerlerine ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (%)	HG	
100 °C / %25	7.11	D	LSD ± 1.328
100 °C / %50	25.17	B	
140 °C / %25	9.19	C	
140 °C / %50	27.25	A*	
Isıl işlem sıcaklığı	\bar{x} (%)	HG	
Isıl işlemsiz	21.25	A*	LSD ± 1.151
185 °C	19.55	B	
212 °C	10.73	C	

\bar{x} : Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, *: En yüksek geri esneme değeri

Tablo 4'e göre; yoğunlaştırma düzeyinde geri esneme oranı en yüksek 140 °C'de %50 sıkıştırılan örneklerde (%27.25), en düşük ise 100 °C'de %25 sıkıştırılan örneklerde (%7.11) elde edilmiştir. Sıkıştırma oranı ve sıkıştırma sıcaklığı artışına bağlı olarak örneklerin geri esneme oranlarında artış görülmüştür. %25 sıkıştırma oranına göre %50 sıkıştırma oranında ve 100 °C'ye göre 140 °C sıkıştırma-presleme sıcaklığında daha yüksek geri esneme değerleri elde edilmiştir. Sıkıştırma nedeniyle deney örneklerinde oluşan iç gerilmelerin sıkıştırma oranı artışı ile artmasının ve sıkıştırma sıcaklığına bağlı olarak örneklerde meydana gelen rutubet kayıplarının sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Zira sıkıştırma sonrası 100 °C'de yoğunlaştırılan örneklerin rutubeti %6.3, 140 °C'de yoğunlaştırılan örneklerin rutubeti

ise %3.2 olarak belirlenmiştir. Literatürde, yüksek sıkıştırma oranında işlem gören ağaç malzemede daha fazla geri esnemenin olduğu bununda, malzeme bünyesinde daha fazla gerilme meydana gelmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir [28,13,14]. Ayrıca, sıkıştırma sürecinde rutubet kayıplarının fazla gerçekleştiği daha yüksek sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerde geri esnemenin daha fazla yaşandığı bununda, iklimlendirme (20 ± 2 °C / $65\pm 3\%$ RH) aşamasında bu örneklerdeki kalınlık artışının fazla olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [13,14]. Farklı bir çalışmada da, termal olarak sıkıştırılmış ağaç malzemede geri esnemenin meydana geldiği bununda, ligninin doğal termoplastik yapısından ve ağaç malzemenin rutubet miktarının, sıkıştırma sürecinde sıcaklığın etkisi ile azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [18].

Isıl işlem sıcaklığı düzeyinde geri esneme oranı değeri en yüksek ısıl işlemsiz örneklerde (%21.25), en düşük ise 212 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış örneklerde (%10.73) elde edilmiştir. Isıl işlem gören örneklerin geri esneme oranlarında azalma meydana gelmiştir. Ayrıca, daha yüksek sıcaklıkta ısıl işlem gören örneklerde geri esneme oranı daha düşük elde edilmiştir. Sıkıştırma nedeniyle oluşan iç gerilmelerin ısıl işlemle rahatlatılması ve ısıl işlem sonrası deney örneklerinde oluşan denge rutubet miktarındaki azalmanın sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Isıl işlem sonrası ıhlamur örneklerin denge rutubet miktarı 185 °C’de işlem görenlerde %7.9, 212 °C’de işlem görenlerde ise %6.0 olarak tespit edilmiştir. Literatürde benzer bir çalışmada da, yoğunlaştırma sonrası uygulanan ısıl işlemin ağaç malzemenin geri esneme özelliğini ve higroskopisitesini önemli ölçüde düşürdüğü, hem daha yüksek ısıl işlem sıcaklığı hem de daha uzun işlem süresinin boyutsal stabilitede daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir [29]. Yoğunlaştırma-ısıl işlem sıcaklığı ikili etkileşimi düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Yoğunlaştırma-ısıl işlem sıcaklığı ikili etkileşimi düzeyinde geri esneme oranı değerlerine ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	Isıl işlem sıcaklığı					
	Isıl işlemsiz		185 °C		212 °C	
	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG
100 °C / %25	10.32	EF	8.55	F	2.47	G
100 °C / %50	29.60	BC	28.01	C	17.90	D
140 °C / %25	12.53	E	10.63	EF	4.40	G
140 °C / %50	32.56	A*	31.02	AB	18.15	D
LSD: ± 2.301						

\bar{x} : Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik gurubu, *: En yüksek geri esneme değeri

Tablo 5'e göre; geri esneme oranı en yüksek 140 °C'de %50 sıkıştırılan ısıtıl işlemsiz örneklerde (%32.56), en düşük ise aralarındaki fark önemsiz olmak üzere 100 °C'de %25 sıkıştırılan 212 °C ısıtıl işlemlili örnekler (%2.47) ile 140 °C'de %25 sıkıştırılan 212 °C ısıtıl işlemlili örneklerde (%4.40) elde edilmiştir.

3.2. Hava kurusu yoğunluk

Termo-mekanik yöntemle yoğunlaştırılmış ve ısıtıl işlem uygulanmış ıhlamur örneklerinin hava kurusu yoğunluk değerlerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Hava kurusu yoğunluk değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P≤0,05
Yoğunlaştırma (A)	4	0.821	0.205	184.1305	0.0000*
Isıtıl işlem sıcaklığı (B)	2	0.050	0.025	22.4288	0.0000*
Etkileşim (AB)	8	0.009	0.001	1.0368	0.4117**
Hata	135	0.150	0.001		
Toplam	149	1.031			

*: 0,05'e göre önemli **: Önemsiz

Varyans analizi sonucuna göre, hava kurusu yoğunluk değerleri üzerinde yoğunlaştırma ve ısıtıl işlem etkileri önemli, bunların karşılıklı etkileşimi ise önemsiz bulunmuştur (P≤0,05). Yoğunlaştırma ve ısıtıl işlem sıcaklığı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Yoğunlaştırma ve ısıtıl işlem sıcaklığı düzeyinde hava kurusu yoğunluk değerlerine ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (g/cm ³)	HG	
Yoğunlaştırılmamış	0.468	D	
100 °C / %25	0.604	B	LSD
100 °C / %50	0.674	A*	± 0.01615
140 °C / %25	0.587	C	
140 °C / %50	0.666	A*	
Isıtıl işlem sıcaklığı	\bar{x} (g/cm ³)	HG	
Isıtıl işlemsiz	0.624	A*	LSD
185 °C	0.596	B	± 0.01251
212 °C	0.579	C	

\bar{x} : Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik gurubu, *: En yüksek yoğunluk değeri

Tablo 7'ye göre; yoğunlaştırma düzeyinde hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek,

aralarındaki fark önemsiz olmak üzere 100 °C’de %50 (0.674 g/cm³) ve 140 °C’de %50 sıkıştırılan örneklerde (0.666 g/cm³), en düşük ise yoğunlaştırılmamış örneklerde (0.468 g/cm³) elde edilmiştir. Yoğunlaştırma sonrası sıkıştırma ve geri esne oranlarına bağlı olarak örneklerin yoğunluklarında artış olmuştur. %25 sıkıştırma oranına göre %50 sıkıştırma oranında ve 140 °C’de yoğunlaştırılanlara göre 100 °C’de yoğunlaştırılan örneklerde daha yüksek yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalarda, sıkıştırma işlemlerinden sonra yoğunlukta meydana gelen artışların, ağaç malzemenin boşluk hacminin azalması ve birim hacim başına düşen hücre çeperi miktarının artması ile açıklanabileceği ifade edilmiştir [13,14].

Isıl işlem sıcaklığı düzeyinde hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek ısıl işlemsiz örneklerde (0.624 g/cm³), en düşük ise 212 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış örneklerde (0.579 g/cm³) elde edilmiştir. Isıl işlem uygulaması ve işlem sıcaklığındaki artış sonrası hava kurusu yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Isıl işlem ile deney örneklerinde meydana gelen kütle kayıplarının ve aynı zamanda örneklerin denge rutubet miktarlarındaki azalmanın sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Literatürde, ısıl işlem sonrası ağaç malzeme yoğunluğundaki azalmaların ana sebeplerinin; ısıl işlem süresince başta hemiselüloz olmak üzere odun bileşenlerinin buharlaşan uçucu ürünlere dönüşmesi, ekstraktif maddelerin buharlaşması ve ısıl işlem uygulaması ile odunun daha az higroskopik olması sonucu daha düşük denge rutubet miktarı olduğu belirtilmiştir [6].

3.3. Radyal doğrultuda şişme oranı

Termo-mekanik yöntemle yoğunlaştırılmış ve ısıl işlem uygulanmış ıhlamur örneklerinin radyal doğrultuda şişme oranı değerlerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Radyal doğrultuda şişme oranı değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P≤0,05
Yoğunlaştırma (A)	4	25045.19	6261.299	1042.1279	0.0000*
Isıl işlem sıcaklığı (B)	2	23820.67	11910.335	1982.3511	0.0000*
Etkileşim (AB)	8	8805.044	1100.630	183.1885	0.0000*
Hata	135	811.105	6.008		
Toplam	149	58482.01			

*: 0,05’e göre önemli

Varyans analizi sonucuna göre, radyal doğrultuda şişme oranları üzerinde

yoğunlaştırma ve ısıtma işlem etkileri ile bunların karşılıklı etkileşimi önemli bulunmuştur ($P \leq 0,05$). Yoğunlaştırma ve ısıtma işlem sıcaklığı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Yoğunlaştırma ve ısıtma işlem sıcaklığı düzeyinde radyal doğrultuda şişme oranı değerlerine ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (%)	HG	
Yoğunlaştırılmamış	5.03	E	
100 °C / %25	17.83	C	LSD
100 °C / %50	38.87	A*	± 1.252
140 °C / %25	16.55	D	
140 °C / %50	36.85	B	
Isıtma işlem sıcaklığı	\bar{x} (%)	HG	
Isıtma işlemsiz	40.00	A*	LSD
185 °C	19.23	B	± 0.9695
212 °C	9.84	C	

\bar{x} : Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik gurubu, *: En yüksek şişme oranı

Tablo 9’a göre; yoğunlaştırma düzeyinde radyal doğrultuda şişme oranı en yüksek, 100 °C’de %50 sıkıştırılan örneklerde (%38.87), en düşük ise yoğunlaştırılmamış örneklerde (%5.03) elde edilmiştir. Yoğunlaştırma sonrası geri esneme oranlarının daha düşük elde edildiği 100 °C’de yoğunlaştırılan örnekler ile yüksek sıkıştırma oranında (%50) yoğunlaştırılan örneklerde sıkıştırma yönü şişme değerleri daha yüksek bulunmuştur. Deney örneklerinin sıkıştırılmadan önceki başlangıç ölçüsüne (kalınlığına) geri dönme eğiliminde olmasının sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Literatürdeki benzer çalışmalarda da, sıkıştırma oranının örneklerin boyutsal stabilitesini önemli derecede etkilediği ve daha yüksek sıkıştırma oranı ile yoğunlaştırılan örneklerde daha fazla şişmenin meydana geldiği belirtilmiştir [13,14,29,30].

Isıtma işlem sıcaklığı düzeyinde radyal doğrultuda şişme oranı en yüksek ısıtma işlemsiz örneklerde (%40.00), en düşük ise 212 °C sıcaklıkta ısıtma işlem uygulanmış örneklerde (%9.84) elde edilmiştir. Isıtma işlem uygulaması ve işlem sıcaklığının artırılması ile yoğunlaştırılmış örneklerin sıkıştırma yönü şişme oranlarında önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Literatürde, ısıtma işlem uygulanmış ağaç malzemenin higroskopiklik özelliğinin düştüğü ve bu düşüşün malzemenin boyutsal kararlılığını arttırdığı belirtilmiş, uygulamanın etkisinin ise işlem zamanına ve işlem koşullarına (sıcaklık,

rutubetin miktarı ve dağılımı, oksijenin varlığı, malzeme boyutları vb.) bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir [20]. Başka bir çalışmada ise, ısıtma işlem sonrası ağaç malzemenin higroskopisitesindeki azalma ile ölçüsel stabilitesinin iyileştiği, higroskopisitenin azalmasında ise hidroksil gruplarının esterleşmesi ve çapraz bağlanma reaksiyonlarının etkili olduğu ifade edilmiştir [31].

Yoğunlaştırma-ısıtma işlem sıcaklığı ikili etkileşimi düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Yoğunlaştırma-ısıtma işlem sıcaklığı ikili etkileşimi düzeyinde radyal doğrultuda şişme oranı değerlerine ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	Isıtma işlem sıcaklığı					
	Isıtma işlemsiz		185 °C		212 °C	
	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG
Yoğunlaştırılmamış	7.23	G	4.69	H	3.16	H
100 °C / %25	31.05	C	14.57	EF	7.86	G
100 °C / %50	68.01	A*	32.48	C	16.10	E
140 °C / %25	28.86	D	13.12	F	7.68	G
140 °C / %50	64.85	B	31.29	C	14.40	EF
LSD: ± 2.168						

\bar{x} : Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, *: En yüksek şişme oranı

Tablo 3.8’e göre; radyal doğrultuda şişme oranı en yüksek 100 °C’de %50 sıkıştırılan ısıtma işlemsiz örneklerde (%68.01), en düşük ise aralarındaki fark önemsiz olmak üzere yoğunlaştırılmamış 212 °C ısıtma işlemli örnekler (%3.16) ile yoğunlaştırılmamış 185 °C ısıtma işlemli örneklerde (%4.69) elde edilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, Termo-Mekanik yöntemle yoğunlaştırılmış ve ısıtma işlem uygulanmış ıhlamur (*Tilia grandifolia* Ehrh.) odununun bazı fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Presleme sıcaklığı bakımından, 140 °C’ye göre 100 °C’de yoğunlaştırılan örneklerde geri esneme oranı daha düşük yoğunluk artışı ve sıkıştırma yönü şişme oranı ise daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca %25 sıkıştırma oranına göre %50 sıkıştırma oranında geri esneme oranı, radyal doğrultuda şişme oranı ve yoğunluk artışı daha yüksek elde edilmiştir. Yoğunlaştırma işlemleri ile örneklerin hava kurusu yoğunluğunda kontrol (yoğunlaştırılmamış) örneklerle göre %44’e kadar artış sağlanmıştır.

Isıtma işlem uygulaması ve işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak yoğunlukta azalma

olmuş ve 212 °C ısıtma işlemli örneklerde en düşük yoğunluk değeri elde edilmiştir. Isıl işlem sonrası ısıtma işlemsiz örneklerle göre yoğunlukta %7'ye kadar azalma meydana gelmiş ancak, geri esneme oranında %50 ve radyal doğrultudaki şişme oranında ise %75'e kadar bir iyileşme sağlanmıştır. Termo-Mekanik yoğunlaştırma ve ısıtma işlemin birlikte kullanılması ile her iki modifikasyon yönteminin bazı önemli dezavantajlarının giderilebileceği belirlenmiştir.

Açıklama: Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığınca desteklenmiştir. Proje No: BAP-2013.07.01.174.

Kaynaklar

- [1] Bekhta P, Proszkyk S, Lis B, Krystofiak T. Gloss of thermally densified alder (*Alnus glutinosa* Goertn.), beech (*Fagus sylvatica* L.), birch (*Betula verrucosa* Ehrh.), and pine (*Pinus sylvestris* L.) wood veneers, Eur. J. Wood Prod. 2014; 72: 799-808.
- [2] Cooper P, Wang J. Enhanced value of moderate grade wood through high temperature modification in oil, Value-to-wood Research Report, Project UT1, 2005.
- [3] Boonstra MJ. A two-stage thermal modification of wood, PhD. thesis, Dissertation in Cosupervision Ghent University and Université Henry Poincaré, Nancy, 2008.
- [4] Sandberg D, Haller P, Navi P, “Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: an opportunity for future environmentally friendly wood products, Wood Material Science and Engineering 2013; 8: 64-88.
- [5] Pelit H. Yoğunlaştırma ve ısıtma işlemin doğu kayını ve sarıçamın bazı teknolojik özellikleriyle üstyüzey işlemlerine etkisi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [6] Korkut S, Kocaefe D. Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi, Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi 2009; 5:2, 11-34.
- [7] Yıldız S. Isıl işlem uygulanan doğu kayını ve doğu ladini odunlarının fiziksel, mekanik, teknolojik ve kimyasal özellikleri, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2002.
- [8] Bekhta P, Niemz P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood, Holzforschung 2003; 57: 539-546.
- [9] Esteves B, Velez MA, Domingos I, Pereira H. Influence of steam heating on the

properties of pine (*pinus pinaster*) and eucalypt (*eucalyptus globulus*) wood, Wood Science Technology 2007; 41: 193-207.

[10] Aydemir D, Gündüz G. Ahşabın fiziksel, kimyasal, mekaniksel ve biyolojik özellikleri üzerine ısıyla muamelenin etkisi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi 2009; 11:15, 71-81.

[11] Şahin Kol H. Characteristics of heat-treated Turkish pine and fir wood after ThermoWood processing, Journal of Environmental Biology 2010; 31: 1007-1011.

[12] Perçin O. Isıl işlemin lamine ahşap malzemenin bazı teknolojik özelliklerine etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.

[13] Pelit H, Sönmez A, Budakçı M. Effects of ThermoWood® process combined with thermo-mechanical densification on some physical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.), BioResources 2014; 9: 4552-4567.

[14] Pelit H, Sönmez A. Termo-mekanik yoğunlaştırma ve ısıl işlemin Doğu kayını (*Fagus Orientalis* L.) odununun bazı fiziksel özelliklerine etkisi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2015; 3:1, 1-14.

[15] Rowell RM, Konkol P. Treatments that enhance physical properties of wood, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-55, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1987.

[16] Kutnar A, Sernek M. Densification of wood, Zbornik Gozdarstva in Lesarstva 2007; 82: 53-62.

[17] Seborg RM, Millett MA, Stamm AJ. Heat-stabilized compressed wood (staypak), Forest Products Laboratory Report No: 1580 (revised), Madison, 1956.

[18] Kollmann FFP, Kuenzi EW, Stamm AJ. Principles of wood science and technology, Wood based materials, Springer-Verlag 1975; 2: 139-149.

[19] Kultikova EV. "Structure and Properties Relationships of Densified Wood, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1999.

[20] Morsing N. Densification of wood: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain, PhD. thesis, Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, 2000.

[21] Blomberg J, Persson B, Bexell U. Effects of semi-isostatic densification on anatomy and cell-shape recovery on soaking, Holzforschung 2006; 60: 322-331.

- [22] TS 2470. Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için numune alma metotları ve genel özellikler, T.S.E. Standardı, Ankara, 1976.
- [23] TS 2471. Odunda, fiziksel ve mekanik deneyler için rutubet miktarı tayini, T.S.E. Standardı, Ankara, 1976.
- [24] Finnish Thermowood Association. ThermoWood handbook, FIN-00171, Helsinki, Finland, 2003.
- [25] Garcia-Romeu ML, Ciurana J, Ferrer I. Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work, *Journal of Materials Processing Technology* 2007; 191: 174-177.
- [26] TS 2472. Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için birim hacim ağırlığı tayini, T.S.E. Standardı, Ankara, 1976.
- [27] TS 4084. Odunda radyal teğet doğrultuda şişmenin tayini, T.S.E. Standardı, Ankara, 1983.
- [28] Laine K, Rautkari L, Hughes M, Kutnar A. Reducing the Set-Recovery of Surface Densified Solid Scots Pine Wood by Hydrothermal Post-Treatment, *Eur. J. Wood Prod.* 2013; 71: 17-23.
- [29] Cai J, Ding T, Yang L. Dimensional stability of poplar wood after densification combined with heat treatment, *Applied Mechanics and Materials* 2012; 152-154: 112-116.
- [30] Ünsal Ö, Candan Z, Büyüksarı Ü, Korkut S, Chang,YS, Yeo H. Effect of thermal compression treatment on the surface hardness, vertical density propile and thickness swelling of eucalyptus wood boards by hot-pressing, *Mokchae Konghak* 2011; 39: 1-8.
- [31] Tjeerdsma B, Militz H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood, *Holz als Roh- und Werkst* 2005; 63: 102-111.